外环控制延时下新能源多场站系统暂态过电压评估

刘昕宇[1]，辛焕海[1]，郑迪[2]，娄云天[1]，梅勇[3]，周保荣[4]

（1. 浙江大学电气工程学院，浙江省 杭州市 310027；2. 中国计量大学机电工程学院，浙江省 杭州市 310018；3. 中国南方电网电力调度控制中心，广东 广州 510663；4. 南方电网科学研究院，广州 510663）

摘要：新能源多场站系统故障恢复期间的暂态过电压问题严重制约了新能源的消纳和发展，然而现有研究缺乏相应的量化指标及方法。为此本文从暂态过电压机理出发，提出了一种考虑无功饱和特性的新能源并网系统暂态过电压风险量化方法。首先，基于新能源多场站系统的暂态过电压机理建立了故障恢复期间不同因素作用下的分析模型，论证了基于准稳态相量模型评估暂态过电压的合理性。在充分考虑了故障后变流器的饱和特性及新能源间相互作用后，导出了新能源多场站系统暂态过电压的评估方法。通过分析系统过电压水平与短路比的关系，提出了适用于新能源多场站系统的过电压短路比指标及其实用化应用流程。算例结果表明，所提指标及方法可有效评估新能源多场站系统暂态过电压风险及系统的安全裕度。

关键词：新能源多场站系统；无功饱和特性；暂态过电压；过电压短路比

Assessment of Temporary Overvoltage in Multiple Renewable Energy Station System with Control Lagging

LIU Xinyu[1]，XIN Huanhai[1], ZHENG Di[2], LOU Yuntian[1], MEI Yong[3], ZHOU Baorong[4]

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China；
2. College of mechanical and electrical engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang Province, China；3. CSG Power Dispatching Control Center, Guangzhou 510663, China; 4. Electric Power Research Institute of CSG，Guangzhou 510663，China)

ABSTRACT: The temporary overvoltage (TOV) during fault recovery process of renewable energy system seriously restricts the development of renewable energy. However, the existing research lacks quantitative indicators of the TOV. Therefore, based on the mechanism of TOV, this paper proposes a method to quantify the TOV risk of multiple renewable energy station system (MRESS) considering the reactive power saturation characteristic. Firstly, based on the TOV mechanism of MRESS, the analysis model under different factors during fault recovery is established, and then the rationality of TOV assessment based on phasor model is demonstrated. After fully considering the saturation characteristics of converters after fault and the interaction between renewable energy generators, an evaluation method for TOV of MRESS is derived. Through analyzing the relationship between TOV of the system and short-circuit ratio, the temporary overvoltage short-circuit ratio (TOVSCR) of MRESS and its application method are proposed. Simulation results show that the proposed method can effectively evaluate the TOV risk and safety margin of the MRESS.

KEY WORDS： Multiple Renewable Energy Station System; reactive power saturation characteristic; temporary overvoltage; temporary overvoltage short-circuit ratio.

0　引言

近年来，我国新能源装机容量持续快速增长，截至 2020 年底，风电和光伏装机均已突破 250 GW[1]。以风电和光伏为代表的新能源机组大量并网，导致电网中同步机占比显著下降，电力系统无功-电压灵敏度升高[2-4]。当新能源场站汇集地区发生的交流短路故障清除后，由于新能源机组无法及时撤回低电压穿越状态发出的无功电流，从而导致交流系统中无功盈余。此时，若交流电网电压支撑能力较弱，则可能引发故障近区电网的暂态过电压问题[5-7]。电压的瞬时大幅升高可能会对新能源设备的绝缘造成不可逆的损伤，因此新能源设备的并网导则规定，当并网点电压大于 1.3 倍的额定电压时，允许相应机组退出运行[8]。若大量机组因过电压脱网，则将严重威胁故障恢复阶段的电压稳定和有功平衡，可能引发更恶劣的连锁反应，危及电力系统的安全稳定运行。因此，如何准确量化新能源多场站系统各设备并网点的暂态过电压水平对电网的安全稳定运行至关重要。

新能源多场站并网系统暂态过电压水平主要由交流电网的电压支撑能力和新能源设备提供的盈余无功大小决定[9]。短路比(short circuit ratio，SCR)常被用于分析含单个新能源设备的交流电网的电压支撑能力和稳定性[10]，即 SCR 越大表明交流电网越强，系统越稳定。然而传统短路比只由设备容量和并网点的外部等值交流电网参数决定，未考虑设备的控制参数以及电网的内部参数，同时用于刻画电网暂态过电压水平时缺乏明确的物理意义。

为此，国内外学者已提出多种评估单馈入系统暂态过电压的指标和方法[11-13]，但这些指标和分析方法只反映了直流闭锁期间无功补偿设备作为盈余无功源时的暂态过电压，难以评估交流故障切除后新能源设备控制延迟的无功盈余造成的暂态过电压。此外，由于未充分考虑多馈入系统中换流器之间的交互作用，上述单馈入暂态过电压分析方法难以向多馈入系统推广。文献[14]尝试将多馈入系统解耦来实现上述方法适用性的拓展，通过将混合多馈入系统中的电力电子设备等值为恒阻抗从而将多馈入系统等效为单馈入系统进行分析。然而各设备并网点电压与设备注入电网的无功互相影响，无法通过某一状态下的静态电压之比反映故障后各设备之间以及各设备与电网之间的动态交互作用，因此该方法尚不能准确刻画多馈入系统的暂态过电压大小。

另一方面，由于故障清除后电路的电磁暂态过程会影响系统暂态过电压的大小，因此已有文献中基于准稳态相量模型的评估方法的合理性有待商榷。同时，考虑换流器的饱和特性后，新能源故障期间发出的无功具有强非线性，故障点越近、故障切除后无功盈余越严重、过电压越严重的规律可能并不成立。因此，现有文献在忽略换流器的无功饱和特性后得到的暂态过电压评估结果偏保守，但考虑饱和特性后通过穷举法来确定引起最严重过电压的故障位置同样具有挑战性。

针对上述问题，本文首先分析了新能源场站并网系统的暂态过电压机理，建立了不同因素作用下的新能源并网系统的数学模型。在此基础上，证明了通过准稳态相量模型评估系统暂态过电压的合理性。进一步，提出了基于准稳态相量模型的多场站并网系统暂态过电压评估方法，并结合其特点定义了过电压短路比指标，提出了相应的实用化应用方法。最后通过仿真验证了所提评估方法在不同场景下的有效性。

1　新能源多场站并网系统暂态过电压机理

如图 1 所示的新能源多场站系统中，当交流线路发生故障时，距故障点较近的新能源场站进入低电压穿越状态，并按照并网导则要求发出大量无功以支撑交流电压，其无功参考值随并网点电压幅值实时调整。尽管故障下新能源机组通常将外环控制切换至无功-电压下垂控制来实现较快的无功响应[8]，但按照并网点电压幅值变化的无功参考值仍将引入电压幅值

检测的延时。加之通讯、执行机构动作时间等因素的影响，故障切除后新能源机组通常在 20-40 ms 的延时(后文统称控制延时)后方能检测到电压幅值的变化[7]。因此，在故障恢复期间，可认为换流器的无功参考值与故障期间保持一致，从而导致新能源场站发出大量的盈余无功，进而造成系统的暂态过电压。此外，故障清除导致电网拓扑发生变化，会引起其内部的电感和电容等储能元件的储能状态发生改变并产生零输入响应，同样可能会引起暂态过电压。因此，本文主要关注上述两种因素作用下的暂态过电压问题。

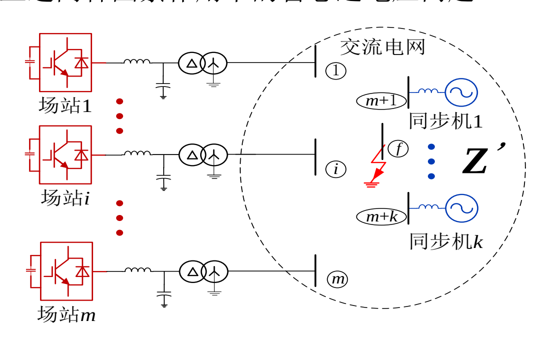


图 1 新能源多场站并网系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the multi-infeed system

值得注意的是，换流器故障期间发出的电流具有饱和效应，因此新能源发出的无功与并网点电压之间的线性关系并不始终成立。此时应综合考虑上述非线性因素和多场站之间的交互作用后，确定导致最严重暂态过电压的故障位置，进而评估该系统的暂态过电压风险。

由于理想前馈补偿的新能源控制器内环时间尺度通常在 ms 级，且锁相环暂态期间可通过切换至“快速锁相环”从而加快其暂态响应[15]，因此可认为检测延时期间新能源发出的电流能有效跟踪其参考值，且锁相环能快速跟踪并网点电压相位。在上述假设条件下，故障切除后应主要考虑控制器外环延迟作用下的暂态过电压响应特性，近似忽略内环和锁相环的动态。

为验证以上分析，采用后文算例中单场站并网系统的模型和参数，其中电网的短路比 SCR = 2。当场站并网点附近发生三相金属性短路故障时，故障清除后并网点电压相位和场站发出的电流的波形如图 2 所示。

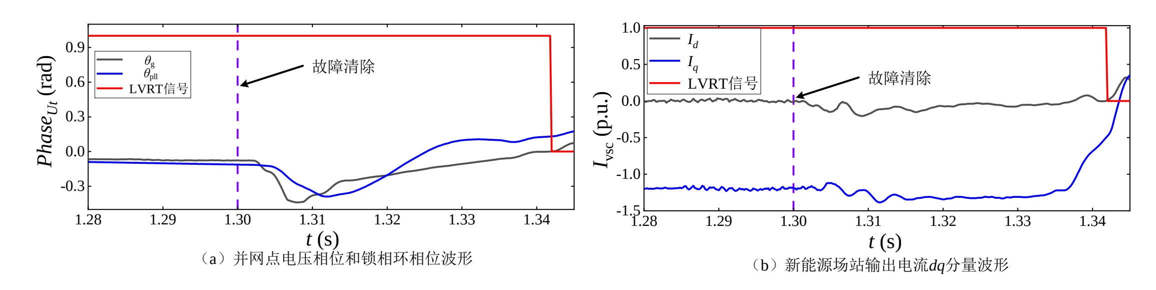


图 2 新能源场站暂态电气量波形

Fig. 2 Transient electrical waveforms of renewable energy station

由图 2 可以看出：（1）新能源场站低电压穿越控制切换存在明显的延时，在故障切除后 40ms 左右才检测到电压越限并进行控制切换；（2）故障切除后的整个恢复过程并网点相位及锁相角变化均不大，内环电流 dq 分量也基本平稳；

因此，为了分析最严重暂态过电压产生的机理，本文忽略有功分量和锁相环跟踪误差的影响，并认为故障清除后系统的暂态过电压主要由电路动态和新能源控制延时两种因素引起。

2　新能源多场站系统暂态过电压分析

2.1 新能源场站系统动态建模

为简化分析，本节基于图 3 所示的新能源单场站系统进行建模。对于直驱风电或光伏等全功率变流器并网的新能源场站，其暂态期间的直流侧电容电压在直流侧卸荷电路和直流电压外环控制器的作用下可近似认为恒定，因此变流器直流电容两侧的动态是解耦的，即应主要关注其网侧的暂态特性。

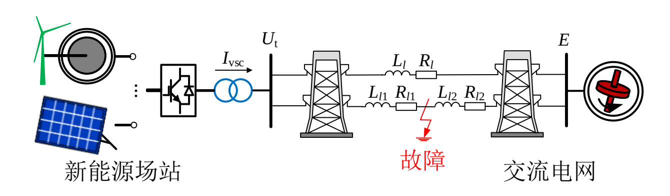


图 3 新能源场站并网系统

Fig. 3 Renewable energy station grid-connected system

在同步旋转坐标系下，故障恢复期间新能源场站并网系统的节点电压方程可表示为：

$$\boldsymbol{Y}_1(s)\boldsymbol{U}_t(s)=\boldsymbol{Y}_2(s)[\boldsymbol{E}(s)-L_{l1}\boldsymbol{I}_{l1f}+L_{l2}\boldsymbol{I}_{l2f}]+\boldsymbol{Y}_2(s)[\boldsymbol{E}(s)-L_l\boldsymbol{I}_{lf0}]+C_f\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)\boldsymbol{U}_{tf}+\boldsymbol{I}_{vq}(s) \quad (1)$$

式中，$\boldsymbol{U}_t(s)$和 $\boldsymbol{E}(s)$分别为新能源场站的并网点电压和电网电压列向量；$\boldsymbol{I}_{vq}(s)=\boldsymbol{I}_{vqf}/s$ 为新能源场站输出电流列向量，$\boldsymbol{I}_{vqf}$ 为故障期间输出电流列向量，即故障恢复期间新能源场站保持故障期间输出电流不变；导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_1$ 和 $\boldsymbol{Y}_2$ 分别为

$$\begin{cases}\boldsymbol{Y}_1(s)=C_f\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)+\dfrac{2}{L_l}[\tau+\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)]^{-1}\\ \boldsymbol{Y}_2(s)=\dfrac{1}{L_l}[\tau+\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)]^{-1}\end{cases} \quad (2)$$

其中，$\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)=\begin{bmatrix}s & -\omega_0\\ \omega_0 & s\end{bmatrix}$，$\tau=\dfrac{R_l}{L_l}=\dfrac{R_{l1}}{L_{l1}}=\dfrac{R_{l2}}{L_{l2}}$，$\omega_0$ 为工频；R_{l1}、L_{l1} 和 R_{l2}、L_{l2} 分别为故障点左侧和右侧线路的电阻和电感，R_l 和 L_l 分别为非故障线路电阻和电感，$R_l=R_{l1}+R_{l2}$，$L_l=L_{l1}+L_{l2}$。

由上述分析可知，当计及系统电压的暂态分量时，需要在高阶系统中评估系统的暂态过电压，从而使得所提方法计算过程复杂且无法推广至多机系统。因此，需要论证过电压动态分量对实际系统安全运行的影响，并对新能源场站系统作出合理的简化，从而得到适用性强且较为实用的评估方案。

2.2 过电压动态分量作用效果评估

为分析过电压动态分量的影响，根据式(1)求解新能源场站并网系统在故障恢复期间的并网点电压为：

$$\boldsymbol{U}_t(s)=\frac{1}{G_u(s)}\boldsymbol{A}(s)=\begin{bmatrix}A_d(s)/G_u(s)\\ A_q(s)/G_u(s)\end{bmatrix} \quad (3)$$

式中，$A_d(s)$和 $A_q(s)$分别为传递函数的 dq 轴分子表达式，具体推导过程及表达式详见附录 A；

$G_u(s)$为传递函数闭环特征方程：

$$G_u(s)=s(s^2+\tau s+\omega_n^2+\omega_0^2-\omega_0\sqrt{2\omega_n^2-\tau^2})\times(s^2+\tau s+\omega_n^2+\omega_0^2+\omega_0\sqrt{2\omega_n^2-\tau^2}) \tag{4}$$

其中，$\omega_n=\sqrt{2/C_f L_l}$。

并网点电压动态分量的特性主要由式(4)的极点决定。式(4)除 s=0 极点外，还可以分解为 2 个二阶系统，其阻尼比和无阻尼自然振荡频率分别为：

$$\xi_1=\frac{\tau}{2\omega_{n1}},\ \omega_{n1}=\sqrt{\omega_n^2+\omega_0^2+\omega_0\sqrt{2\omega_n^2-\tau^2}},\ \xi_2=\frac{\tau}{2\omega_{n2}},\ \omega_{n2}=\sqrt{\omega_n^2+\omega_0^2-\omega_0\sqrt{2\omega_n^2-\tau^2}}。$$

因此可通过式(3)反变换得到并网点电压的 dq 动态分量时域表达式，进一步可合成为并网点电压的幅值表达式，即并网点电压的包络线，其 dq 动态分量中分别包含 2 种振荡衰减分量，其振荡频率分别为 $\omega_{d1}=\omega_{n1}\sqrt{1-\xi_1^2}$ 、 $\omega_{d2}=\omega_{n2}\sqrt{1-\xi_2^2}$ 。这两种振荡衰减分量的振荡频率在第 4 节算例中 SCR=2 的典型参数下分别为 230 Hz 和 315 Hz，其一周波过电压尖峰不超过 3 ms。根据 IEEE 2800-2022 标准，新能源设备应能够耐受 1.6 p.u.过电压至少 1 ms，耐受 1.4 p.u.过电压至少 3 ms[16]。因此，电路动态引起的暂态过电压通常不会对设备安全造成威胁。

另一方面，高频谐波会影响锁相环和幅值检测等环节的响应速度，不利于新能源机组的控制和运行，因此机组通常经过一定的滤波环节来获得电网电压信息。例如采用时间常数为 1 ms 的一阶低通滤波器时，其截止频率仅为 159 Hz，此时机组难以检测到上述高频的过电压，获得的电压信息近似为控制延时作用下的暂态过电压。同时考虑到电压幅值检测算法（如全波傅里叶）或者控制切换确认延时的影响，机组控制切换或保护通常不会在电路动态引起的暂态过电压下动作。

因此，电路动态引起的暂态过电压从设备安全和机组保护动作等方面均不会对机组的安全运行造成影响，对系统级暂态过电压风险评估的影响也有限。而由控制延时导致的暂态过电压持续时间主要取决于延时长短，其大小取决于盈余无功，从设备耐受时间和保护检测动作等方面均可能造成设备的损坏或脱网，对系统安全威胁相对更大，因此在多场站系统的暂态过电压风险评估主要关注控制延时引起的暂态过电压。此时，宜采用准稳态相量模型评估暂态过电压。

2.3 新能源场站系统准稳态建模

当不考虑过电压的动态分量时，可由式(3)得到换流器控制延时导致的暂态过电压复频域表达式为：

$$\boldsymbol{U}_t(s)=\frac{4\boldsymbol{U}_s+\boldsymbol{H}+\boldsymbol{J}+\boldsymbol{K}}{Ds} \tag{5}$$

其中，$\boldsymbol{U}_s$ 为交流电网等值电势，式(5)推导及式中常数项($\boldsymbol{H}_d$，$\boldsymbol{J}_d$，$\boldsymbol{K}_d$，$\boldsymbol{D}$)的定义详见附录 B。

根据并网导则要求，当故障期间并网点电压幅值（U_t）跌落至 0.9 p.u.以下时，新能源场站输出电流参考值相量为[8]：

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{vsc}=(I_{vdf}-jI_{vqf})e^{j\theta_f} \\ I_{vdf}=\sqrt{I_{\max}^2-I_{vqf}^2} \\ I_{vqf}=I_{vq0}+k(0.9-U_t) \end{cases} \tag{6}$$

其中，$I_{\max}$ 为新能源场站最大允许电流，I_{vq0} 为故障前的无功电流参考值，k 为无功增益系数，

θ_f为故障期间场站并网点的相位。

在感性主导的网络中，无功功率对电压的影响远大于有功功率，由于本文主要关注最严重过电压发生的情况，因此可认为故障期间换流器的容量均用于提供无功功率，此时 I_{vdf}=0。此外，由于故障期间场站无有功输出，因此 θ_f 可近似为 0。此时，新能源场站的控制坐标系和系统的全局坐标系一致，式(6)变为 $\boldsymbol{I}_{vsc} = -jI_{vqf}$ 。

由此可得暂态过电压的工频稳态值为：

$$TOV = U_t - U_{t0} = \frac{4U_s + H_d + J_d + K_d}{D} - U_{t0} \tag{7}$$

忽略线路电阻后，并考虑到滤波电容 C_f 的值很小，则式(7)可以化简成：

$$TOV \approx -X_g I_{vq} \tag{8}$$

其中，X_g 是电压源到并网点的等值电抗。式(7)的推导见附录 B 可以看出，暂态过电压的大小主要由新能源场站故障期间发出的无功电流以及 X_g (电网强度)决定。

考虑到输出无功电流受控于并网点电压，为避免多馈入系统中的迭代求解[18]，可将新能源场站等效为恒定的无功电流源 $I_{vsc}= k+I_{vq0}$、虚拟电抗 X_k=1/k 和可变无功电流源 I_v 并联，等效电路如图 4 所示，该等效的具体证明见附录 C。

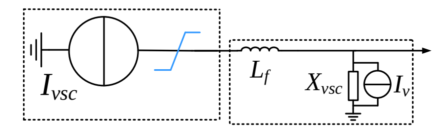


图 4 新能源场站等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of renewable energy station

图中，X_{vsc}=X_k//X_{cf}，X_{cf}=1/(ωC_f)，R_g 和 X_g 分别为交流系统等值电阻和电抗。此模型利用 I_v 的突变来表征故障前后两种工况，可实现电压计算中新能源与电网的解耦。由于故障前电网各节点电压接近 1 p.u.，且运行于单位功率因数下的 VSC 所发电流为 $\boldsymbol{I}_{vsc} = i_{d0}$。因此故障恢复期间相比于故障前，系统全局坐标系下新能源场站发出无功电流大小的变化量为：$\Delta I_v = -0.1k - i_{d0}\sin\theta_0$。

2.4 新能源多场站系统暂态过电压评估

考虑一个有 m 个新能源场站接入和 k 台同步机电源的 n 节点电力系统，如图 1 所示，其中，节点 i(i=1,…,m)为新能源场站并网节点，节点 f 为故障节点，节点 j(j=m+1,…, m+k)为同步机节点，其余为无源节点。系统原始阻抗矩阵为 $\boldsymbol{Z}$，当采用 2.1 节所述等效模型后，各场站 L_{vsci} 被归为交流电网侧时，交流电网的节点阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 被修正为 $\boldsymbol{Z'}$。

当交流电网的 f 节点处发生三相金属性短路故障时，由节点方程可知，各节点电压变化量为：

$$\Delta \boldsymbol{U} = \boldsymbol{Z}'\Delta \boldsymbol{I} \tag{9}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{U}$= [ΔU_1, …ΔU_f, …ΔU_n]^{T}，$\Delta\boldsymbol{I}$=[0,…ΔI_{qi},…ΔI_f…0]^{T}。

由式(9)可得新能源场站故障期间发出的无功电流为：

$$\boldsymbol{I}_{vqf} = \boldsymbol{S}(\boldsymbol{KZ}'\Delta\boldsymbol{I} + \Delta\boldsymbol{I}_q + \boldsymbol{I}_{vq0}) \tag{10}$$

其中，$\Delta\boldsymbol{I}_q$=[$-i_{d01}\sin\theta_{0i}-0.1k_1$, …$-i_{d0i}\sin\theta_{0i}-0.1k_i$, 0,…0]^{T}。$\boldsymbol{S}$=diag($S_i$)，$\boldsymbol{K}$=diag($k_i$)。

在换流器饱和环节的作用下：$I_{vqfi} \le I_{\max}S_i$，此时可通过求解新能源场站的等效无功增益系数从而考虑多场站交互作用的影响：

$$k_{li}=\begin{cases}k_i & I_{vqfi}\le I_{\max}\\ \dfrac{-Z_b+\sqrt{Z_b^2+2Z_aI_{eqi}}}{Z_a} & I_{vqfi}>I_{\max}\end{cases} \tag{11}$$

其中，$Z_a=0.2(|\boldsymbol{Z}'_{ii}|-|\boldsymbol{Z}'^2_{if}|/|\boldsymbol{Z}'_{ff}|)$、$Z_b=|Z'_{if}|/|Z'_{ff}|+Z_k$ 和 $Z_k=\sum_{j=1,\ j\ne i}^{m}[0.1k_j(|Z'_{ij}|-|Z'_{fj}||Z'_{if}|/|Z'_{ff}|)S_j]$ 均为与故障位置有关的常数，S_i 为额定容量与系统基准容量的比值，$I_{eqi}=I_{\max}-I_{vq0i}$ 为考虑初始无功电流的等效饱和值。因此，换流器故障前的运行状态也会影响暂态过电压大小，当 I_{vq0} 越小时，近端严重故障下换流器的运行范围越大，其发出的盈余无功电流越大，此时系统的暂态过电压越严重。

由式(10)和式(11)可得考虑换流器饱和环节作用的盈余无功电流的大小为：

$$\Delta\boldsymbol{I}_{vqf}=\boldsymbol{S}(\boldsymbol{K}_l\boldsymbol{Z}'\Delta\boldsymbol{I}+\Delta\boldsymbol{I}_q) \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{K}_l$=diag($k_{l1}, k_{l2},\ldots, k_{lm},\ldots0$)。其中，第 i 个场站发出的盈余无功电流具体形式为：

$$\begin{aligned}\Delta I_{vqi}&=k_{li}(1-0.1\frac{|Z'_{ff}|}{|Z'_{if}|}+\\ &\sum_{j=1}^{m}[0.1k_{lj}(|Z'_{ij}|\frac{|Z'_{ff}|}{|Z'_{if}|}-|Z'_{jf}|)S_j])\frac{|Z'_{if}|}{|Z'_{ff}|}S_i=S_{eqi}\frac{|Z'_{if}|}{|Z'_{ff}|}\end{aligned} \tag{13}$$

其中，Z'_{ij} 为修正节点阻抗矩阵中第 i 行第 j 列的元素，S_{eq} 为故障下新能源场站的等效暂态容量。

由于故障切除后处于低穿控制状态的新能源场站为盈余无功源，其在控制延迟期间引起的暂态压升即为所求解的暂态过电压。因此，新能源多场站系统中第 i 个场站并网点暂态过电压为：

$$\begin{aligned}TOV_i&=\sum_{j=1}^{m}|Z_{ij}|\Delta I_{vqj}\\ &=\sum_{j=1}^{m}S_{eqj}\frac{|Z_{ij}||Z_{ii}|}{|Z_{ii}||\tilde{Z}_{ff}|}|Z'_{jf}|=|Z_{ii}|\sum_{j=1}^{m}\frac{|Z'_{jf}|}{|Z'_{ff}|}\mathrm{MIIF}_{ij}S_{eqj}\end{aligned} \tag{14}$$

式中，MIIF_{ij} 为场站 i 与场站 j 之间的电压相互作用因子[17]。

3 新能源多场站并网系统过电压短路比

3.1 过电压短路比指标

由式(14)可知，电网强度越大时，电网各节点间连接越紧密($|Z_{ij}|$越小)，系统的暂态过电压越小。因此电网强度与系统的暂态过电压呈反比，可根据式(14)定义如下短路比指标来量化新能源多场站并网系统的暂态过电压风险。

定义：故障恢复期间，新能源设备由于控制延迟导致的最大的并网点暂态过电压的倒数为新能源多场站并网系统的过电压短路比(Temporary Overvoltage Short Circuit Ratio，TOVSCR)：

$$\mathrm{TOVSCR}=(\frac{1/|Z_{ii}|}{\sum_{j=1}^{m}\mathrm{MIFIF}_{ij}S_{eqj}})=(\frac{S_{aci}}{\sum_{j=1}^{m}\mathrm{MIFIF}_{ij}S_{eqj}}) \tag{15}$$

式中，多馈入故障相互作用因子(Multi-Infeed Fault Interaction Factor，MIFIF)可表示为：

$$\mathrm{MIFIF}_{ij}=\frac{|Z_{ij}|}{|Z_{ii}|}\times\frac{|Z'_{jf}|}{|Z'_{ff}|}=\alpha_{if}\cdot\mathrm{MIIF}_{ij} \tag{16}$$

其中，$\alpha_{if}=|Z'_{jf}|/|Z'_{ff}|$ 为故障作用系数，通过对 CIGRE 提出的 MIIF 进行修正，充分考虑了故障下多机间的交互作用。

值得一提的是，本文提出的 TOVSCR 与文献[19-20]提出的 gSCR 形式一致，且都是基于加权电网灵敏度的理念。可以发现，TOVSCR 与 gSCR 分别根据系统暂态过电压和小干扰稳定性的机理确定了合适的加权系数，从而使系统的安全性和稳定性评估更加准确且具有严格的理论基础。

由上述分析可知，本文提出的过电压短路比指标是基于系统的静态特性定义的，是一个线性的指标，但它可以表征系统在大干扰下的暂态过电压风险。容易发现，本文通过合理的等效建模方法，将故障前后网络拓扑的改变巧妙地转化为等效恒流源大小的改变。

值得注意的是，本文所提评估思路不局限于新能源控制延时导致的暂态过电压。由式(15)和式(16)可知，对于如直流闭锁或换相失败等场景下无功补偿设备未及时投切引起的暂态过电压问题，只需根据其机理调整盈余无功电流的大小即可得到相应的指标。

当系统中某一场站因其并网点电压达到限值(U_{tlimit})而脱网时，其余场站可能面临连锁脱网的风险。因此可以认为，当各场站并网点电压的最大值等于 U_{tlimit} 时，该系统处于临界安全状态，此时 TOVSCR 的值即为该系统的临界过电压短路比(critical TOVSCR，CTOVSCR)：

$$\mathrm{CTOVSCR}=1/(U_{\text{tlimit}}-U_{t0}) \tag{17}$$

3.2 过电压短路比指标的应用方法

由式(17)可知，考虑了换流器无功饱和特性后，TOVSCR 的值与故障点的位置呈非线性关系，难以直接判断系统最严重过电压对应的故障位置。因此需要遍历系统中全部节点才能得到所有工况下最大的 TOVSCR，从而评估系统的暂态过电压风险。为提高效率和实用性，应提出一种 TOVSCR 的实用化应用方法。

新能源场站采用图 4 所述的解耦等效建模方法，可得到相应的修正网络。此时若将等效后的新能源场站视为发电流的恒电流负荷，则网络中包含两类节点：由换流器和无源节点组成的负荷节点以及由发电机和调相机组成的电压源节点。因此可将网络导纳矩阵按照负荷节点和电压源节点进行分块：

$$\boldsymbol{B}'=\begin{pmatrix}\boldsymbol{B}'_{\text{LL}} & \boldsymbol{B}'_{\text{LU}}\\ \boldsymbol{B}'_{\text{LU}} & \boldsymbol{B}'_{\text{UU}}\end{pmatrix} \tag{18}$$

其中，矩阵 $\boldsymbol{B}'_{\text{LL}}$ 和 $\boldsymbol{B}'_{\text{LU}}$ 分别表征了负荷之间以及电压源和负荷之间的连接关系和交互作用。

由系统的无功潮流方程可知：

$$\boldsymbol{Q}_{\text{L}}+diag(\boldsymbol{U}_{\text{L}})\boldsymbol{I}_{vq}=diag(\boldsymbol{U}_{\text{L}})\left(\boldsymbol{B}'_{\text{LL}}\boldsymbol{U}_{\text{L}}+\boldsymbol{B}'_{\text{LG}}\boldsymbol{U}_{\text{G}}\right) \tag{19}$$

其中，$\boldsymbol{Q}_{\text{L}}$ 和 $\boldsymbol{I}_{vq}$ 分别为各无源节点无功需求和换流器发出的无功电流列向量，$\boldsymbol{U}_{\text{L}}$ 和 $\boldsymbol{U}_{\text{G}}$ 分别为负荷节点和同步机节点的电压列向量。

当网络空载时，$\boldsymbol{Q}_{\text{L}}=\boldsymbol{0}$，此时各负荷节点电压，即空载电压为：

$$\boldsymbol{U}_{\text{L0}}=\boldsymbol{B}'^{-1}_{\text{LL}}\left(\boldsymbol{I}_{vq}-\boldsymbol{B}_{\text{LG}}\boldsymbol{U}_{\text{G}}\right) \tag{20}$$

因此，系统任意工况下各无源节点的无功需求为：

$$\boldsymbol{Q}_{\text{L}}=diag(\boldsymbol{U}_{\text{L}})\boldsymbol{B}'_{\text{LL}}\left(\boldsymbol{U}_{\text{L}}-\boldsymbol{U}_{\text{L0}}\right) \tag{21}$$

由式(21)可得系统的无功-电压灵敏度矩阵：

$$J=\frac{\partial \boldsymbol{Q}_{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{U}_{\mathrm{L}}}=diag(\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}})\boldsymbol{B}'_{\mathrm{LL}}+\left[\boldsymbol{B}'_{\mathrm{LL}}\left(\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{L0}}\right)\right] \tag{22}$$

当系统运行在轻载或空载时，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{L0}}$，此时：

$$\boldsymbol{J}=diag(\boldsymbol{U}_{\mathrm{L0}})\boldsymbol{B}'_{\mathrm{LL}}=\boldsymbol{B}'_{\mathrm{LL}} \tag{23}$$

由于多馈入系统中各节点的过电压大小通常略高于空载电压，因此由式(23)得到的无功-电压灵敏度矩阵可以近似刻画故障清除后系统各节点电压和无功之间的关系。

当忽略较小的 $\Delta\boldsymbol{I}_q$ 以后，任意节点电压下各换流器发出的盈余无功功率的大小可表示为：

$$\Delta\boldsymbol{Q}_v=diag(\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}})\Delta\boldsymbol{I}_v=diag(\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}})\boldsymbol{S}\boldsymbol{Z}'diag^{-1}(\boldsymbol{Z}') \tag{24}$$

此时，换流器饱和环节的影响体现在对修正阻抗矩阵中的元素进行限幅：

$$(Z'_{if}/Z'_{ff})_{\max}=(I_{\max}-I_{vq0i})/k_i \tag{25}$$

系统中不同节点故障引起的暂态过电压的相对大小可由相应的盈余无功输入加权下的无功-电压灵敏度矩阵进行评估：

$$\boldsymbol{J}_e=\boldsymbol{J}^{-1}\Delta\boldsymbol{Q}_v=\boldsymbol{B}'^{-1}_{\mathrm{LL}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{Z}'diag^{-1}(\boldsymbol{Z}') \tag{26}$$

由上述分析可知，矩阵 $\boldsymbol{J}_e$ 的最大元素所对应的行和列分别表征系统最严重的过电压所在新能源场站并网点以及引起该过电压的故障所在位置。因此，本文提出的基于矩阵 $\boldsymbol{J}_e$ 的系统暂态过电压评估方法可适用于任意结构的网络，具有较强的适应性。

从上述分析可以看出，尽管新能源场站的控制系统中有饱和等强非线性环节，但通过确定最严重工况对应的故障点，并选择合适的换流器无功出力系数即可排除此非线性环节对过电压短路比的影响。

3.3 暂态过电压评估流程

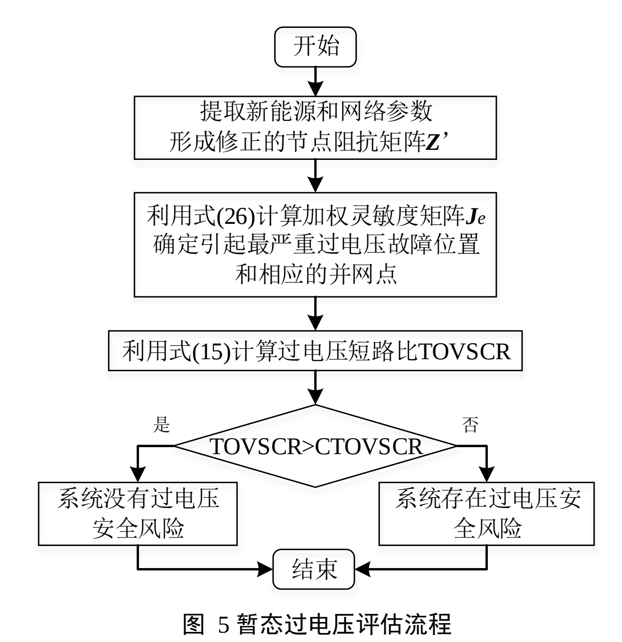


图 5 暂态过电压评估流程

Fig. 5 Evaluation process of temporary overvoltage

根据上述分析，新能源场站并网系统暂态过电压评估可概括为图 5 所示的流程，关键步骤为：

1）确定系统中各设备故障前稳态期间的功率，并获取网络正常运行时的拓扑结构和参数；

2）利用式(26)计算加权灵敏度矩阵 $\boldsymbol{J}_e$，确定过电压最严重的并网点以及相应的故障位

置；

3）利用式(15)计算系统的过电压短路比 TOVSCR；

4）对比过电压短路比与其临界值，该差值能够表征系统的过电压安全裕度。

4 算例分析

为验证本文所提新能源电力系统暂态过电压计算方法的有效性，本节基于 PSCAD 仿真平台搭建仿真模型。如图 6 所示，分别针对单场站并网系统和多场站并网系统的暂态过电压进行分析。其中，单场站并网系统结构如图(a)所示，同一场站中的多台设备可等值为一台设备。多场站并网系统采用 IEEE 新英格兰 39 节点测试系统，其结构如图(b)所示，各场站均采用全功率型新能源设备。仿真系统的参数如附录 D 中表 D 所示，网络参数与标准测试系统保持一致[21]。

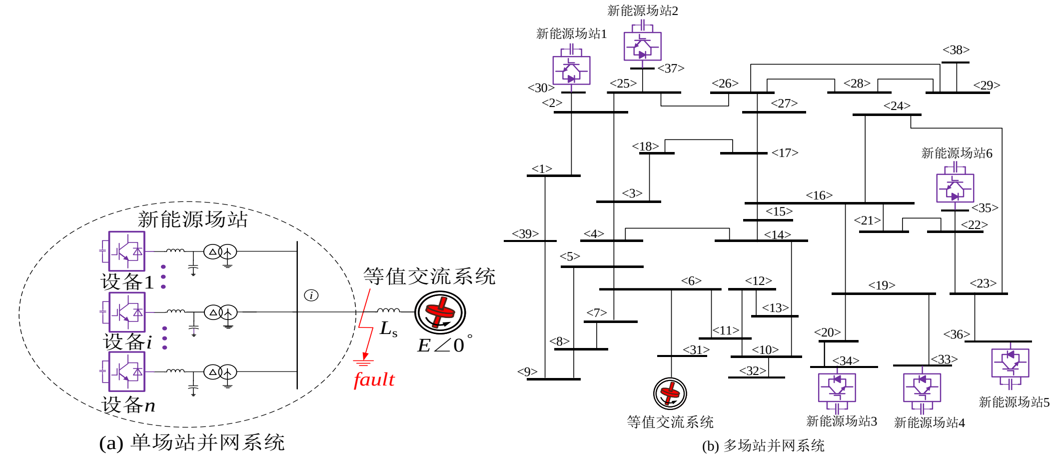
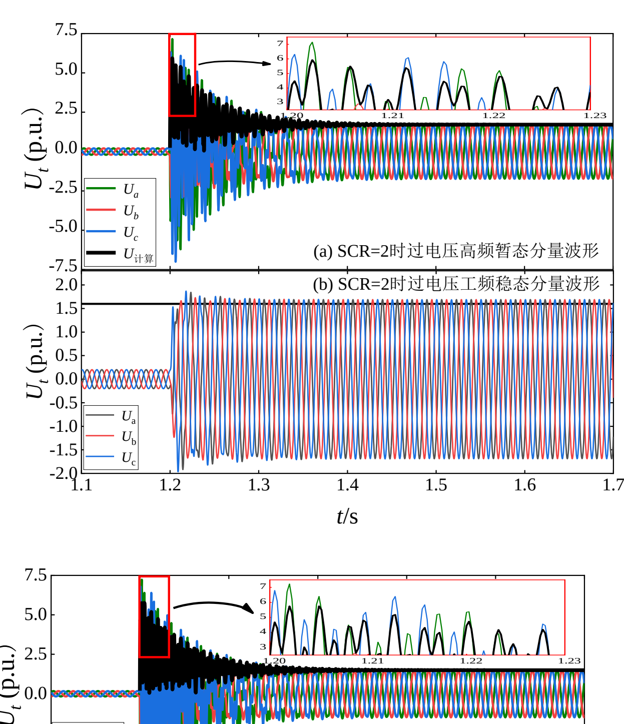


图 6 仿真系统示意图

Fig. 6 Diagram of simulation system

4.1 系统准稳态建模的合理性验证

为了验证故障恢复期间系统暂态过电压计算方法的有效性，分别设置等值交流系统的短路比为 2 和 3。在并网点附近于 t =1 s 发生持续 0.2 s 的三相短路故障，由仿真分析可得并网点电压高频暂态分量的有效值波形和相应的工频稳态分量有效值波形。通过式(3)和式(7)可分别对过电压暂态分量包络线和工频稳态值进行相应计算，其对比结果如图 7 所示。



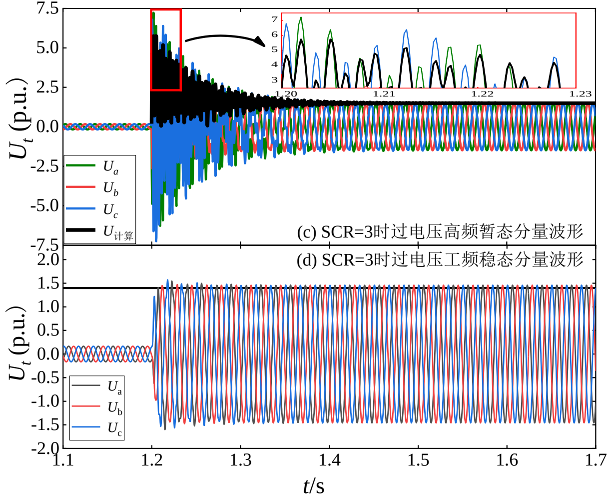


图 7 单场站并网系统暂态过电压仿真和计算结果

Fig. 7 Simulation and calculation results for the temporary overvoltage in a single-infeed system

由图(a)和(c)可以看出，不同电网强度下，计算得到的电路动态引起的暂态过电压的包络线可有效反映其有效值的变化趋势。由(b)和(d)可见，计算得到不同工况下的工频稳态分量和仿真得到的结果基本一致，最大误差仅为 3.17%，证明本文所提过电压计算方法具有较好的准确性。

另外需要说明的是，电路动态引起的暂态过电压振荡频率非常高（图中 SCR=2 时主要包含 230 Hz 和 310 Hz），通常设备控制系统会设置一定滤波器滤除高频谐波，以保证控制平稳。以时间常数为 10 ms 的一阶低通滤波器为例，其截止频率为 16 Hz，经滤波后 230 Hz 和 310 Hz 频率的电压分量幅值分别衰减至 6.92 %和 5.13 %。因此设备的控制和保护系统获得的电压信息主要为滤波后控制延时引起的过电压工频分量(图 7(b)和(d))，这也是影响设备是否脱网的主要因素。因此面向系统安全的多场站并网系统的暂态过电压风险评估更适合采用控制延时主导的计算方法。

4.2 多场站暂态过电压风险评估方法有效性验证

为验证本文所提短路比指标的有效性，本节对不同强度的电网的暂态过电压风险进行评估。为保持电网各节点之间相对的电压支撑能力不变，可通过等比例调整设备的容量从而等

效调整系统的强度。当设备容量与附录 D 中表 D 一致时，多场站系统的加权灵敏度矩阵计算结果如图 8 所示。

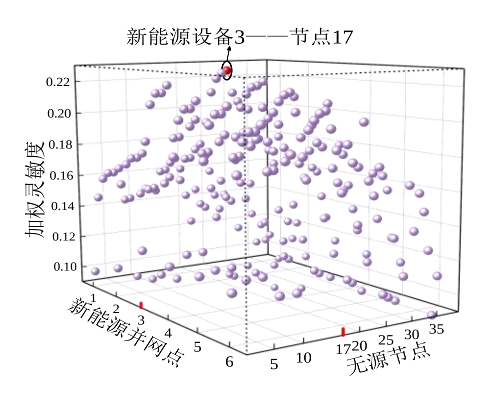


图 8　多场站并网系统加权灵敏度矩阵计算结果

Fig. 8 Calculation results for the weighted sensitivity matrix of multi-infeed system

由图 8 可知，当 17 节点故障时新能源场站 3 的暂态过电压最严重。因此在 t =1 s 时，于节点 17 处施加持续 0.1 s 的三相接地故障，且故障后 30 ms 内新能源机组继续保持低电压穿越状态。

经计算可知，此时系统的过电压短路比为 2.51，即此时最严重的暂态过电压达到了 1.4 p.u.，系统存在过电压风险。各新能源机组故障恢复期间的并网点电压曲线如图 9 所示。

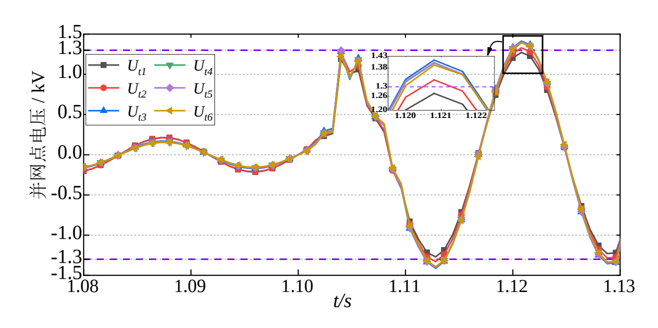


图 9　多场站并网系统暂态过电压仿真结果

Fig. 9 Simulation results of temporary overvoltage in multi-infeed system

可以看出，在故障清除后的控制延迟的作用下，由于各换流器保持低穿期间所发无功电流不变，因此各并网点电压在盈余无功源的激励下迅速升高并达到稳态峰值 1.41 p.u.，与解析计算结果一致。

将各设备容量等比例减小 0.24 倍，即电网强度等效提升相应的倍数，此时多场站并网系统的加权灵敏度矩阵计算结果如图 10 所示。

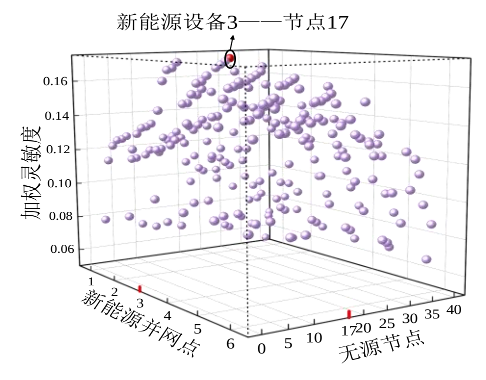


图 10　电网增强的系统加权灵敏度矩阵计算结果

Fig. 10 Calculation results for the weighted sensitivity matrix of the enhanced system

由于在 17 节点故障时系统的 MIOSCR= CMIOSCR= 3.33，因此系统处于暂态过电压意

义下的临界安全状态。此时系统的新能源场站并网点电压曲线如图 11 所示。

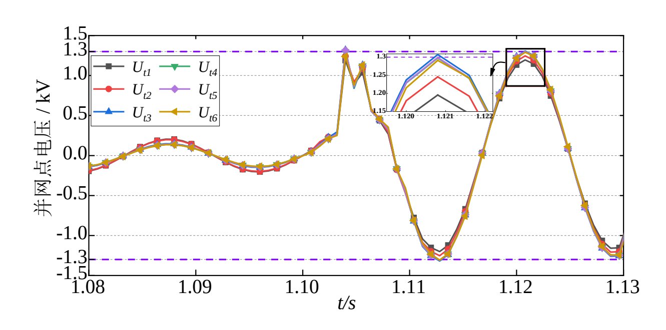


图 11 电网增强的系统暂态过电压仿真结果

Fig. 11 Simulation results of temporary overvoltage in the enhanced system

综上，本文所提指标的计算结果与时域仿真结果相一致，新能源多场站系统的过电压短路比与其临界值之间的距离可以反映系统的过电压安全裕度，验证了本文所提指标的有效性。

5 结论

本文通过分析新能源场站并网系统的暂态过电压机理，提出了故障恢复不同阶段的暂态过电压计算方法，并提出了适用于多场站系统的过电压短路比指标。主要结论如下：

（1）从新能源机组耐受时间及其保护动作等角度来说，控制延时是影响系统级暂态过电压风险评估的主要因素，此时应基于准稳态相量模型对其评估；

（2）临界过电压短路比为一定值，从电力系统静态等值角度提出的过电压短路比指标与其临界值之间的距离可以准确刻画系统的过电压安全裕度；

（3）考虑了换流器的无功饱和特性后，采用加权灵敏度矩阵可以直接得到多场站系统暂态过电压最严重的新能源并网点以及相应的故障节点的位置，避免了繁复的穷举计算，使所提评估方法适用于任意的网架结构。

过大的盈余无功电流和较弱的电网强度是导致系统出现暂态过电压的主要原因。在新能源快速发展中应充分考虑暂态过电压的风险，保证一定的电网强度水平以避免过电压导致的连锁故障。一方面，通过研究更多的暂态过电压产生机理，从而将本文的评估思路推广至更多的场景中。另一方面，改进新能源场站故障期间和恢复期间的控制结构和控制策略来抑制暂态过电压，将是未来的研究工作。

参考文献：

[1] 2020 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.
National electric power industry statistics in 2020 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.

[2] 袁小明，程时杰，胡家兵．电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]．中国电机工程学报，2016，36(19)：5145-5154．
Yuan Xiaoming，Cheng Shijie，Hu Jiabing．Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J] . Proceedings of the CSEE，2016，36(19)：5145-5154(in Chinese)．

[3] 陈国平,李明节,许涛，等．关于新能源发展的技术瓶颈研究[J].中国电机工程学报,2017,37(01):20-27.
Chen Guoping, Li Mingjie, Xu Tao，et al．Study on Technical Bottleneck of New Energy Development [J]．Proceedings of the CSEE, 2017, 37(01): 20-27. (in Chinese)．

[4] 卓振宇,张宁,谢小荣，等．高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化，2021, 45(09): 171-191.

Zhuo Zhenyu，Zhang ning，Xie Xiaorong, et al．Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]．Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(09): 171-191. (in Chinese)．

[5] 孙华东，张振宇，林伟芳，等. 2011 年西北电网风机脱网事故分析及启示[J]. 电网技术，2012，36(10): 76-80.

Sun Huadong, Zhang Zhenyu, Lin Weifang, et al. Analysis on Serious Wind Turbine Generators Tripping Accident in Northwest China Power Grid in 2011 and Its Lessons [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80(in Chinese).

[6] 杜维柱,罗亚洲,李蕴红，等. 风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J/OL].中国电机工程学报:1-14.

Du Weizhu, Luo Yazhou，Li Yunhong，et al．Reviews of Transient Overvoltage Problem Cause by Extra Reactive Power in Large Scale Wind Power Systems [J]．Power System Technology，2001，25(7)：18-22(in Chinese)．

[7] 赵宏博,姚良忠,王伟胜，等. 大规模风电高压脱网分析及协调预防控制策略[J]. 电力系统自动化，2015，39(23):43-48+65.

Zhao Hongbo，Yao Liangzhong，Wang Weisheng，et al. Outage analysis of large scale wind power under high voltage condition and coordinated prevention and control strategy[J]．Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23):43-48+65. (in Chinese)．

[8] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会．GB/T 19963.1—2021 风电场接入电力系统技术规定[S]．北京：中国标准出版社，2021.

State Administration for Market Regulation，Standardization Administration. GB/T 19963.1—2021 Technical specification for connecting wind farm to power system[S]．Beijing：China Standard Press，2021(in Chinese)．

[9] 贺静波，庄伟，许涛，等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. 电网技术，2016，40(6)：1839-1844.

He Jingbo，Zhuang Wei，Xu Tao，et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures［J］. Power System Technology，2016，40(6)：1839-1844. (in Chinese)．

[10] CIGRE Working Group 15.05 Guide for planning DC links terminating at AC locations having low short circuit capacities，part I：AC/DC system interaction phenomena [R]．CIGRE Guide，No.95，1992．

[11] 王峰，刘天琪，丁媛媛，等. 直流闭锁引起的暂态过电压计算方法及其影响因素分析［J］. 电网技术，2016，40(10)：3059-3065.

Wang Feng，Liu Tianqi，Ding Yuanyuan，et al. Calculation method and influencing factors of transient overvoltage caused by HVDC block［J］. Power System Technology，2016，40(10)：3059-3065. (in Chinese)．

[12] 尹纯亚，李凤婷，周识远，等. 基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法［J］. 电力系统自动化，2019，43(10)：150-154，161.基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法

Yin Chunya，Li Fengting，Zhou Shiyuan，et al. Calculation method of transient overvoltage due to DC blocking based on short circuit ratio of reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems，2019，43(10)：150-154，161. (in Chinese)．

[13] 曹生顺，张文朝，王蒙，等. 大容量直流发生功率大扰动时送端风机暂态过电压快速分析方法研究［J］. 高电压技术，2017，43(10)：3300-3306.

Cao Shengshun，Zhang Wenchao，Wang Meng，et al. Study on fast analysis method transient fundamental frequency overvoltage of wind turbine generators in sending system when serious power disturbances occur in large-capacity UHVDC[J]. High Voltage Engineering，2017，43(10)：3300-3306.

[14] Xiao Hao, Duan Xianzhong, Zhang Yi，et al. Analytically assessing the effect of strength on temporary overvoltage in hybrid multi-Infeed HVdc systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 3, pp. 2480-2484, March 2022.

[15] 唐王倩云,张睿,胡家兵.用于系统暂态行为分析的双馈风机转子转速控制时间尺度暂态模型[J].中国电机工程学报,2021,41(09):3037-3046.

Tang Wangqianyun, Zhang Rui, Hu Jiabing. Modelling of DFIG-based WT for Power System Transient

Responses Analysis in Rotor Speed Control Timescale[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3037-3045.
[16] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems [S]. IEEE Std 2800-2022, 2022: 1-180.
[17] Davies J．CIGRE WG B4.41 report：systems with multiple DC infeed[R]．CIGRE Electra，2007．
[18] 潘国清，曾德辉，王钢，等．含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J].中国电机工程学报，2014，34(04)：555-561.
Pan Guoqing，Zeng Dehui，Wang Gang，et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(04)：555-561.
[19] 辛焕海，董炜，袁小明，等．电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]．中国电机工程学报，2016，36(22)：6013-6027．
Xin Huanhai，Dong Wei，Yuan Xiaoming，et al．Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]．Proceedings of the CSEE，2016，36(22)：6013-6027(in Chinese)．
[20] 辛焕海，甘德强，鞠平.多馈入电力系统广义短路比：多样化新能源场景[J]．中国电机工程学报，2020，40(17)：5516-5527.
Xin Huanhai，Gan Deqiang, Ju Ping. Generalized Short Circuit Ratio of Power Systems With Multiple Power Electronic Devices: Analysis for Various Renewable Power Generations[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(17)：5516-5527.
[21] Manitoba Hydro international Ltd. PSCAD knowledge base. IEEE 39 Bus System. Manitoba, Canada; 2018. Available online: https://www.pscad.com/knowledge-ba se/article/28.

附录 A

根据式(1)求解 $U_t(s)$可得

$$\boldsymbol{U}_t(s)=\frac{\boldsymbol{Y}_2(s)}{\boldsymbol{Y}_1(s)}[2\boldsymbol{E}(s)+L_{l2}\boldsymbol{I}_{l2f}-L_{l1}\boldsymbol{I}_{l1f}-L_l\boldsymbol{I}_{lf0}]+C_f\frac{\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)}{\boldsymbol{Y}_1(s)}\boldsymbol{U}_{tf}+\frac{\boldsymbol{I}_{vq}(s)}{\boldsymbol{Y}_1(s)} \tag{A.27}$$

代入各变量表达式即可得

$$\boldsymbol{U}_t(s)=\frac{1}{G_u(s)}\boldsymbol{A}(s)=\begin{bmatrix}A_d(s)/G_u(s)\\A_q(s)/G_u(s)\end{bmatrix} \tag{A.28}$$

其特征方程为

$$G_u(s)=(s^2+\tau s+\omega_n^2+\omega_0^2)^2-\omega_0^2(2\omega_n^2-\tau^2) \tag{A.29}$$

式(A.28)分子表达式为

$$\boldsymbol{A}(s)=\boldsymbol{Y}_3(s)\{2\boldsymbol{E}(s)+L_{l2}\boldsymbol{I}_{l2f}-L_{l1}\boldsymbol{I}_{l1f}-L_l\boldsymbol{I}_{lf0}+\frac{2}{\omega_n^2}[\tau+\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)]\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)\boldsymbol{U}_{tf}+L_l\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)\boldsymbol{I}_{vq}(s)\} \tag{A.30}$$

其中，传递函数矩阵 $\boldsymbol{Y}_3(s)$为：

$$\boldsymbol{Y}_3(s)=\begin{bmatrix}s^2+\tau s+\omega_n^2-\omega_0^2 & \omega_0(2s+\tau)\\-\omega_0(2s+\tau) & s^2+\tau s+\omega_n^2-\omega_0^2\end{bmatrix}$$

典型线路参数下 τ 很小，式(A.29)的第二项为正；对其进行因式分解后 2 个二阶因式的常数项为 $\omega_n^2+\omega_0^2\pm\omega_0\sqrt{2\omega_n^2-\tau^2}$，不难看出 2 个常数项均为正且远大于 τ，由此分解所得 2 个二阶因式均呈现欠阻尼振荡。

附录 B

首先，忽略式(1)中的动态分量和动态元件储能，即传递函数 $\boldsymbol{G}_{s\omega}(s)$ 中的 s 项，以及电感和电容的初始

电流和电压，可得：

$$\left(\begin{bmatrix}0 & -\omega C_f \\ \omega C_f & 0\end{bmatrix}+2\begin{bmatrix}R_l & -\omega L_l \\ \omega L_l & R_l\end{bmatrix}^{-1}\right)\boldsymbol{U}_t(s) = \begin{bmatrix}R_l & -\omega L_l \\ \omega L_l & R_l\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\frac{2U_s}{s} \\ 0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{I_{vd}}{s} \\ \frac{I_{vq}}{s}\end{bmatrix} \tag{B.1}$$

之后，通过矩阵求逆运算，整理得到并网点电压的解析表达式为：

$$\boldsymbol{U}_t(s)=\frac{4\boldsymbol{U}_s+\boldsymbol{H}+\boldsymbol{J}+\boldsymbol{K}}{Ds} \tag{B.2}$$

其中：

$$\boldsymbol{U}_t(s)=\begin{bmatrix}U_{td}(s) \\ U_{tq}(s)\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{U}_s=\begin{bmatrix}U_{sd} \\ 0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}H_d \\ H_q\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}J_d \\ J_q\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}K_d \\ K_q\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{J}$、$\boldsymbol{K}$ 和 D 定义如下：

$$\begin{cases}H_d=2R_l I_{vd} \\ H_q=2R_l I_{vq}\end{cases} \tag{B.3}$$

$$\begin{cases}J_d=\left(-2\omega L_l+\omega C_f R_l^2\right)I_{vq} \\ J_q=\left(2\omega L_l-\omega C_f R_l^2\right)I_{vd}\end{cases} \tag{B.4}$$

$$\begin{cases}K_d=-2\omega^2 C_f L_l U_s+\omega^3 C_f L_l^2 I_{vq} \\ K_q=-2\omega C_f R_l U_s-\omega^3 C_f L_l^2 I_{vd}\end{cases} \tag{B.5}$$

$$D=C_f^2 L_l^2\omega^4+C_f^2 R_l^2\omega^2-4C_f L_l\omega^2+4 \tag{B.6}$$

由式(B.2)-(B.6)，根据终值定理可得：

$$\begin{cases}U_{td}=\dfrac{4U_s+H_d+J_d+K_d}{D} \\ U_{tq}=\dfrac{H_q+J_q+K_q}{D}\end{cases} \tag{B.7}$$

考虑到故障清除后延时期间设备的有功电流保持不变，即 $i_{vd}=i_{vdf}=0$，且由于网络感性占优，即电网中电阻较小，因此系统的暂态过电压主要为 d 轴分量，即 $U_t=U_{td}, U_{tq}\approx 0$。

忽略线路电阻，则 U_t 的表达式可以写为：

$$U_t=\frac{4U_s+H_d+J_d+K_d}{D}=\frac{4U_s-2X_l I_{vq}-2B_f X_l U_s+B_f X_l^2 I_{vq}}{4+B_f^2 X_l^2-4B_f X_l} \tag{B.8}$$

其中，$B_f=\omega C_f$，$X_l=\omega L_l$。考虑到滤波电容 C_f 很小，可以忽略 B_f 的项，因此有：

$$U_t=U_s-X_g I_{vq} \tag{B.9}$$

其中，$X_g=0.5X_l$，是电压源到并网点的双回线总电抗值。由于通常 $U_s\approx U_{t0}$，则：

$$TOV \approx -X_g I_{vq} \tag{B.10}$$

附录 C

由式(7)可知，当忽略了换流器故障期间发出的有功电流分量后，其发出的电流可整理为：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}_{vsc} &= -j(I_{vq0} + k(0.9 - U_t)) = -j(I_{vq0} + 0.9k - kU_t) \\ &= \underbrace{-j(I_{vq0} + k)}_{I_{vsc}} + \underbrace{jkU_t}_{Y_k} + \underbrace{j0.1k}_{I_v} \end{aligned} \tag{C.1}$$

因此，可将新能源场站等效为恒定的无功电流源 $I_{vsc}= k+I_{vq0}$、虚拟电抗 $X_k=1/Y_k=1/k$ 以及可变无功电流源 I_v 的并联。

附录 D

表 D 多馈入系统额定参数

Tab.A1 Rated parameters of the multi-infeed system

项目	参数	值
新能源	滤波电容	0.1 p.u.
	滤波电感	0.1 p.u.
	控制延迟	30 ms
	无功出力系数（k）	2 p.u.
	滤波器时间常数（T_f）	5 ms
	电流饱和值（I_{max}）	1.2 p.u.
	设备 1 容量；设备 2 容量；	0.5; 0.75
	设备 3 容量；设备 4 容量；	0.75; 1
	设备 5 容量；设备 6 容量；	0.75; 1
交流系统 1	额定电压	230 kV
	额定容量	200 MVA
	短路比	2、3
	线路阻感比	0.1
交流系统 2	额定电压	230 kV
	额定频率	60 Hz
	额定容量	400 MV·A